

PEFC の技術課題と FCEV の開発動向

竹中 啓恭

通商産業省 工業技術院 大阪工業技術研究所

〒 563-8577 池田市緑が丘 1-8-31

Recent Progress of PEFC Technology and Fuel Cell Electric Vehicle

Hiroyasu TAKENAKA

Osaka National Research Institute

1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577

The importance of hydrogen as a fuel will steadily increase in future, mainly due to environmental necessities. Currently, many major carmakers are developing electric vehicles with polymer electrolyte fuel cell(FCEV), expecting it to become one of the promising alternatives to replace gasoline-powered vehicles. This paper summarizes the latest progress of PEFC technologies and the FCEV's, and the prospective contribution of them to introduction of wide use of hydrogen fuel in future is also discussed.

Key words: polymer electrolyte fuel cell, fuel cell electric vehicle, hydrogen utilization.

1. はじめに

1998 年度世界人口白書によると、現在の世界の人口は 59 億 3 千万人、21 世紀半ばには 94 億人になると予測されている。今後、発展途上国の人口の急激な増加に加えて、経済成長に伴うエネルギー消費量の増加を考慮すれば、世界で必要なエネルギー量は指数関数的に増加することになる。化石燃料が 90 % を占める現在のエネルギー供給体制がそのまま、エネルギー消費量が増加することは、CO₂ 排出に起因する地球温暖化問題からもはや許されないことは、COP3 における削減目標値を見るまでもなく明らかである。このため石炭→石油→天然ガスのように CO₂ 排出のより少ない燃料への転換等が図られることになるが長期的には資源枯渇の問題が顕在化してくる。したがって、目前に迫った 21 世紀には、省エネルギー・省資源技術およびクリーンな代替エネルギー技術等の開発・導入・普及が人類にとって不可避となる。とりわけ我が国にとっては省エネルギー・省資源技術の開発や社会的理解に根ざした原子力の導入が重要と考えられている。

燃料電池発電技術は発電効率が高く、コージェネレーションが可能で、燃料の多様化が図れ、環境調和性に優れ、分散配置ができる等の特徴を持つことから、これらの問題に対応できる手段の一つとして実用化が期待されている。このため、ニューサンシャイン(NSS)計画の枠組みの中で燃料電池発電技術は太陽エネルギー技術とともに加速的に推進すべきプロジェクトと位置付けられてきた。燃料電池には、用いる電解質によってアルカリ型燃料電池(AFC)、リン酸型燃料電池(PAFC)、熔融炭酸塩型燃料電池(MCFC)、固体電解質型燃料電池(SOFC)、固体高分子型燃料電池(PEFC)と様々なタイプがあり、それぞれの特長に応じた用途が期待されている。NSS 計画における燃料電池の研究開発では、昭和 56 年度から平成 2 年度までは PAFC を中心として開発が進められ、平成 3 年度からは MCFC に重点を移した研究開発が進められている。SOFC は平成元年度から、PEFC は平成 4 年度から研究開発が開始され今日に至っている。燃料電池の国プロとしては PEFC は最も遅く開始されたが、次節に述べるように最近の自動車用途への期待の急速な高まりから、「高効率クリーンエネルギー自動車の

研究開発 (平成 9 年度開始) や平成 5 年度に開始された WIENET 計画の第 II 期計画 (平成 11 年度～) の中においても PEFC 自動車関連の研究開発が行われるようになってきている。

本稿では、燃料電池の中でもとくに近未来の水素利用技術につながると予測される PEFC 技術課題と開発動向、また、特に期待されている自動車用途の国内外の動向について、その概要を述べる。

2. PEFC の歴史的背景

固体高分子型燃料電池 (PEFC) は、米国 General Electric 社によって開発され、1960 年代の初期にジェミニ宇宙船に搭載された実績を持つ、いわば古い歴史を持つ燃料電池である。開発当時の膜は耐久性がなく改良が続けられたが、化学的安定性に優れたフッ素系イオン交換膜 Nafion[®] が DuPont 社で開発されたことから膜の耐久性の問題は解決された。その後、宇宙・軍用と特殊用途として注目されていたが、経済性などの理由からその開発はごく一部の機関に限られていた。

一方、今日の PEFC 開発のリーディングメーカーであるカナダの Ballard Power Systems 社は民生用にも適用できる FC であるとの考えから 1980 年に独自に開発を開始し、1987 年に新しい膜 (Dow 膜) を用いて従来性能をしのぐ高効率・高出力密度を発表し、また、他機関から PEFC の短所の 1 つであった高価な白金の必要量を大幅に低減する方法など、技術的ブレークスルーの可能性が提示された。折しも、近年の地球環境問題やカリフォルニア州の自動車排ガス規制強化 (1990) の動向等の社会的背景が重なり、主に電気自動車用の FC として、PEFC が注目され米国エネルギー省 (DOE) のプロジェクトを始め研究開発が急速に拡大してきた。日本では前述のように NSS 計画において PEFC プロジェクトが 1992 年に開始されて本格化した。

最近では、国のプロジェクトや従来型の FC 開発に携わってきた電機メーカーだけでなく国内外の主要自動車メーカーのほとんどが近未来自動車の有力候補の 1 つと位置付けて研究開発を開始することとなり、試作車の試走や実用化計画を公表するメーカーが多くなっている。

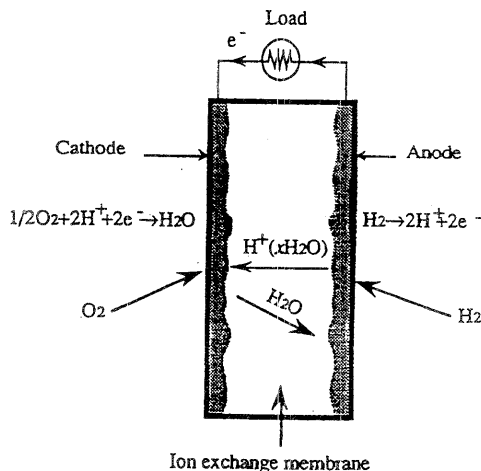


図 1 PEFC の原理図

3. 原理と特徴

PEFC は図 1 の原理に示したように、フッ素樹脂系のイオン交換膜をプロトン伝導体に用い膜の両面にガス拡散電極層を接合した全固体型構造となっている。アノード側に水素、カソード側に酸素あるいは空気を供給すると、アノード側で水素が酸化されてプロトンになり膜中を移動してカソードで酸素の還元に使われて水になる反応により電気を取り出せる。セルはこの膜-電極接合体 (全体厚みとして数十～数百 μm) の両側から流体の通路もかねた支持集電体/セパレーターを押し当てて構成する。このセルのスタッキングは複極板セパレーターおよび数セル間隔で FC の発熱を冷却する機能を持ったセパレーターを介して行う。なお、膜は含水状態で良好なプロトン伝導性を持つので膜の乾燥を防ぐために反応ガスが加湿される。

一般的な PEFC 本体の長所と短所を掲げる。

(1)長所

- ①本質的に固体だけからなるセルであるため、電解質の逸散・保持等の問題がなく電池構造が簡単で、メンテナンスが容易。
- ②膜が差圧に耐えるため電池の加圧制御が容易。
- ③低温で作動するため、常温で起動でき起動時間もきわめて早い。
- ④システムの材料の選択が容易。
- ⑤長寿命が期待される。
- ⑥高出力密度が得られるため、小型軽量化が可能。
- ⑦広い電流密度範囲で作動できるため負荷変動の大きな用途にも使用できる。
- ⑧CO₂を含む燃料ガスが使用できる。

上記、①、②は電解質溶液ではなく固体電解質膜を用いることによる特徴である。③、④、⑤は常温で作動できる特徴で、電池寿命も純ガス条件であれば6万時間以上の耐久性が確認されており、材料そのものの安定性は高い。⑥は低抵抗膜と活性な電極を用いた時の特徴であり、純ガスや加圧下では極めて高い出力密度 (2~3 W/cm²) が実証されている。また、低負荷時の高い電圧でも電極材料が溶出しにくいので低負荷から高負荷まで適用できる。

(2)短所

①常温作動型であるため排熱温度が低く、排熱利用が制限される。②改質ガスを使用する場合、電極がCOに被毒されやすくCO除去が必要である。③電池構成材料が比較的高価。④膜の水分管理が必要。

常温作動型である特徴は、逆に排熱を利用しにくい、200°C付近で作動するPAFCよりCO被毒が起りやすいという短所となる。③の問題は、過去のPEFCの研究開発の進展や拡大を最も阻害した要因の一つと考えられる。最近では、後述のように白金触媒使用量の大幅低減が可能になっているが、膜材料やセパレータのコスト低減がどこまでできるかが課題となっている。④の水分管理は、現状使用されている膜が含水状態で良好な伝導性を持つために不可欠である。

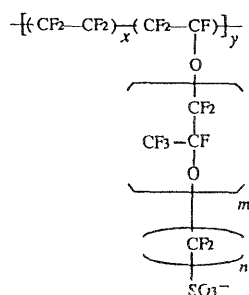
PEFCは可搬型や定置型発電装置の用途の他に、とりわけ自動車用途に適するとされる。常温(通常100°C以下)で作動起動が容易であるため頻繁な起動停止に適する、高エネルギー密度化小型軽量化が可能で容積・重量の制限のある用途に適する、固体のみから構成されメンテナンスが容易であることから、振動・衝撃に耐え幅広いユーザーを対象とした用途に適することなどの特徴による。

PEFCの技術課題は、上記長所をいかに発揮させかつ短所を技術的・経済的に克服するかという点に集約できる。

4. 構成材料と技術課題

4.1 高分子電解質膜

使用する膜は図2のような構造を持つフッ素樹脂系イオン交換膜であり、DuPont社のNafion[®]が著名である。さらに、Dow Chemical社の膜(Dow膜、



Nafion [®]	: m ≥ 1, n = 2, x = 5 - 13.5, y = 1000
Dow膜	: m = 0, n = 2
Aciplex [®]	: m = 0, 3; n = 2 - 5, x = 1.5 - 14
Flemion [®]	: m = 0, 1; n = 1 - 5
EW	= 850 - 1200

図2 フッ素樹脂系イオン交換膜の構造

現在供給停止)、日本では旭化成(Aciplex[®])、旭硝子社製(Flemion[®])の膜が知られている。いずれも類似構造をもちその性質も類似している。これらの膜は架橋構造を持たない線状ポリマーからなり、図2の-(CF₂-CF₂)_x一部の結晶性で固体として存在している。交換基濃度が一定以上高くなると側鎖の構造的障害からその結晶性が弱くなり溶液化するため側鎖の導入量には制限がある。側鎖が短いほど結晶性に及ぼす側鎖の構造的影響は小さくなるので、より多くの交換基を導入でき膜抵抗が低下することになる。Dow膜はこのような考えに基づき、m = 0のビニルモノマーを合成して側鎖を短くして交換基をより多く導入した膜である^{3, 4)}。Dow膜は現在生産停止になっているが、他社の膜においても交換基濃度を若干増加させる等によって性能的にはそれほど差がないのが現実である。

以上のパーフルオロ系膜は、交換基濃度が高く、膜厚が小さいほど膜抵抗が低下し、PEFC性能を向上させるが、反面、含水率が大きくなって機械的強度も弱くなるなど信頼性やハンドリング性が低下する。このため、最近では、PTFE多孔体にパーフルオロイオン交換樹脂を含まれ浸透させて膜厚が小さくても寸法安定性に優れた膜(Gore-select膜)やPTFEの細糸や繊維で補強した膜(旭化成、旭硝子)^{5, 6)}が試みられている。

一方、上記パーフルオロ系膜はその製造工程の複

雑さからコストの飛躍的な低減が困難とされることや、間欠的な使用形態である自動車用途等にはそれほど長期の累積使用時間 (5000hrs.程度) が要求されないことから、耐久性には劣るものの大幅なコスト低減が見込める放射線グラフト重合膜^{7,9)} やリン酸ドーブ PBI (poly-benzimidazole)^{10,11)} およびトリフルオロスチレン重合樹脂含浸多孔体膜¹²⁾ 等の代替膜の開発も行われている。しかし、自動車用途の市場が拡大すれば、パーフルオロ系膜のメーカーもコストダウンが可能とも表明されており、これら代替膜の開発には必要な耐久性や伝導性ととも、パーフルオロ系膜のコスト低減の限界をしのぐコストに対する見通しが必要となる。

4.2 水分管理

PEFC では膜は水蒸気雰囲気中に置かれる。水蒸気分圧の低下とともに膜中の含水率が低下し¹³⁾、膜抵抗が急激に増大する。このため膜を飽和蒸気圧に近い条件に管理する必要がある。PEFC 作動中は、アノードからカソードに向かって膜中を移動するプロトンは電子浸透によって数個の水分子を伴う(電気浸透による移動水)。この移動水はカソードで電極反応によって生成する水とともにカソード側のガス流とともにセル外に排出され、一部は膜中の水の濃度勾配によってアノード側に逆拡散する。アノード側はカソード側に持ち去られる雰囲気にあるため乾燥しがちになるため、燃料ガスの加湿が必要となる。また、カソード側は逆に濡れる雰囲気にあり、過度に濡れると反応が阻害され性能低下を起こすが、空気を用いる場合などガス流量が多くなる場合には、セル外に持ち出される水蒸気量が多くなるので、カソードガスも加湿されることが多い。なお、膜厚が小さいほどアノードへの水の逆拡散が容易になるので水分管理も容易となる^{14,15)} 加湿の一般的な方法は、膜加湿方式(内部加湿方式)と呼ばれるもので、ガス供給加湿に必要な温度はセルの運転温度に近くかつ排熱も利用できることから、加湿部分は電池本体と一体化される。外部加湿方式は予め加湿器で加湿しセルに供給する方法である。その他の加湿方法としては多孔質セパレーターの背面に水を供給しセパレーターを通してセル内に直接水を供給する直接水加湿方式¹⁶⁾もある。また、白金や酸化物微粒子を膜中に分散させた膜を用いて、膜中を拡散する水

素・酸素がその微粒子表面で生成する水によって膜の乾燥を防ぐガス加湿を要しない方法¹⁷⁾も検討されている。加湿そのものは難しい技術ではないが、例えば、セルが大型化し、ガスの入り口から出口に至るガス組成分布、温度分布、電流分布と同様に工学的に加湿のセル内の均一性を保持する技術が必要になる。

4.3 触媒電極と膜電極製造法

触媒電極にはアノード、カソードとも活性化過電圧の小さな白金が用いられる。アノード過電圧は小さいが、酸素を還元するカソードの過電圧が活性化過電圧成分の大部分を占める。表面積の大きな白金黒が使用されることもあるが、白金量の低減や分散性等から白金担持カーボンが使用される。燃料電池作動時には活性化過電圧の他に膜抵抗や導体部の抵抗からなる抵抗による分極成分および反応ガスの拡散律速過程に起因する濃度分極成分がある。空気や改質ガスを用いる場合には、特に濃度分極が大きくなる傾向があるので、できるだけガス供給が良好な多孔質ガス拡散電極とセル構造が必要である。また、燃料極に改質ガスを使用する場合にはガス中に含まれる CO によって白金電極が被毒されるので予め CO を除去する選択酸化触媒とともに、Pt-Ru の耐 CO 触媒^{18,19)}が必要になる。

活性化過電圧は電極触媒量や触媒表面積、実際の反応に関与する触媒の利用率に依存する。電極反応はいわゆる三相界面(電解質-触媒電極-反応ガス)で起こるが、PEFC では電解質が固体膜であるために、反応場所が電極と膜との接触界面に限定され、白金の利用率が低下する傾向にある。このため同じ膜材料からなる溶液(Nafion[®] 溶液)をガス電極の膜接合側に塗布乾燥して電極作動面積を 3 次元化することによって拡大し、触媒の利用率を向上させ触媒量の低減を図る手段が探られる^{20,21)}。白金担持量はかつては少なくとも 4 mg/cm² 程度必要とされていたがこのような手法や電極反応層を薄くしてあるいは反応が支配的に起こる接合界面だけ白金量を多くする手法等によって 1/10 以下に低減されている。市場拡大を前提とすれば、触媒リサイクルシステムが構築されるであろうが、依然として白金触媒の低減・代替法の開発が課題となる。

ガス拡散電極は一般には、調製した触媒粒子と撥水材・結着材である PTFE を混合して作製するのが

基本で、これに造孔剤が添加される場合もある。これらを原料として熱処理等によって電極シートを作製する、あるいは混合スラリーを支持集電体であるカーボンのペーパー・布に塗布してから熱処理をして、その後、上記膜溶液を接合側の触媒層に塗布・合浸して、ホットプレス（百数十℃以上：膜のガラス転移点以上）によって膜に接合する。膜溶液は3次元化だけでなく、膜と電極層との接合剤としても機能する。電極や接合法に関しては各社のノウハウになっているが、いずれにしても電極反応面積の効果的な増加とともに、反応ガス供給、生成水の逸散等物質移動が容易な電極層構造が課題である。その他、触媒スラリーを印刷法で膜に塗布するあるいはホットロール法など量産化を視野に入れた様々な方法が工夫されている。

4.4 セパレーター

材料としては膜表面が強酸性を有するので耐酸性と良好な導電性をもつガス不浸透性のカーボン板が多く用いられ、その表面にガス流路を形成するために溝加工が施される。このようなセパレーターのコストはモジュールコストの多くを占めるので、樹脂モールドカーボンやプレス加工が可能な膨張化黒鉛基材のガス不浸透カーボン板等より安価なセパレーター製造法が検討されている。また、カーボン材の他に、チタンやステンレス等の金属セパレーターも検討されているが、接触抵抗が大きくなる傾向にあり表面を貴金属メッキする必要がある。一方、セパレーター表面の流路形状については、カソードで生成する水を速やかに排出するため、早いガス流速が必要で流路の溝断面を小さくしたり、サーペンタイン（蛇行）型に加工される。

いずれにしてもセパレーターは極室分離機能の他に、マニホールド形成、シールや冷却機能、物質の均一分配機能を持つモジュールの基本的構成材料であるので構造の最適化および量産化技術が必要で、現状、かなりの低価格化が進められているものの一層の低価格化が求められよう。

4.5 燃料調製

燃料として純水素を用いる場合はほとんど問題がないが、メタノールや天然ガスを用いる場合は改質器とCOの可級の除去が課題となる。特に自動車用途を前提とすると、改質そのものは既存技術であるが、改質器のコンパクト化・高効率化、負荷変動に伴う燃料供給追従性、起動時間の短縮など技術課題は多い。

改質については水蒸気改質法が一般的であるが負荷変動追従性とコンパクト化が開発課題となっている。部分酸化法は負荷変動や起動性については対応しやすいが、水素発生量が少なく効率が悪くなる問題がある。その他、水蒸気改質・部分酸化併用法なども検討されている。

改質ガスに含まれるCO（0.1～1%程度）を必要な燃料供給速度で可級的に10ppm以下程度に除去するコンパクトな選択酸化触媒器が必要である。通常CO濃度の数倍程度の酸素を注入するが、触媒の選択性が高くないと、その分燃料の水素も消費されるので効率低下の一因となる。CO許容濃度は、電極触媒と作動温度等に依存し、条件によっては100ppm程度でも良いと言われる。現在、CO対策としてはRtやRu系触媒の選択酸化器と、Pt-Ru耐CO合金触媒電極の両方から検討が進められている。

表1 Daimler-Benzによる低公害車の比較

車の種類および燃料形態	エネルギー使用量 (kWh/100km)	タンクの大きさ (ℓ/750km)	CO ₂ 排出量 (g/750km)
FCEV(再生可能エネルギー源水素)	20(20)	230	0
FCEV(天然ガス源水素)	32(20)	230	64(0)
FCEV(天然ガス源メタノール)	39(26)	44	87(63)
水素エンジン車(再生可能エネルギー源水素)	43(43)	570	0
水素エンジン車(天然ガス源水素)	68(43)	570	137(0)
電気自動車(PEV)	59(19)	1030	116(0)
ガソリン車	52(43)	38	125(114)
ディーゼル車	45(38)	29	110(99)

() 内は運転時のエネルギー使用量およびCO₂排出量を示す。
出典) The 4th Daimler-Benz Seminar 資料より

5. 用途と課題

5.1 自動車用途

PEFC に供給する水素は化石燃料から再生可能エネルギーまでほとんどの一次エネルギーから製造できる。表 1 に PEFC 搭載自動車 (FCEV) の環境適合性を既存の内燃機関、二次電池電気自動車、水素エンジン車と比較した Daimler-Benz のデータ²⁹⁾を示した。地球環境及び大気保全の視点からは、再生可能エネルギー源水素を用いた水素が最も優れる。FCEV は高効率を得られるので、天然ガス源水素を用いた場合でも同じ水素を用いた水素エンジン自動車よりも優れることになる。表 1 の二次電池電気自動車のデータは搭載する二次電池の種類によって変わるが、いずれにしても走行中に排出するガスはないものの、充電電力の発電所における排出に依存しトータルで見れば必ずしもクリーンとは言えないことになる。

各国の FCEV のプロジェクトを表 2 にまとめた。現在、FCEV への燃料供給方式として考えられているのは、純水素、メタノール改質ガス、ガソリンの部分酸化による水素などである。環境や効率面からは、ガソリン<メタノール<純水素の順に優れ、他方インフラストラクチャーの容易さの面からは純水素<メタノール<ガソリンの順に優れることになる。このような視点から、乗用車にはメタノールが有力と考えられている。メタノールを用いた水蒸気改質法は、他の化石燃料と比べると、比較的低い温度で改質することができ改質エネルギーも少なくすむ。メタノールは天然ガスから製造できるので脱石油を図ることができ将来的にはバイオマスや太陽エネルギーを使って合成できる等の特徴を持っている。しかし、負荷追従性や起動性、コンパクト化が現状の技術課題となっており、また、近未来の普及時に安価なメタノールの供給インフラが形成可能か不透明な課題もある。

表 2 PEFC を搭載した FCEV の開発動向

E U	<ul style="list-style-type: none"> ● バス/液体水素、250km、 ● バン/液体水素、500km、 ○ バス/水素ガス、300km、 ○ PeugeotCitroen/DeNora/Ansaldo/Solvay、HYDO-GEN 計画 	<ul style="list-style-type: none"> Ansaldo/De Nora (1996)、EQHHP 計画 Renault/Volvo/De Nora (1997) Ansaldo/Neoplan/DeNora (1999)
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> ● Daimler-Benz 燃料電池自動車の開発、BPS、Ford との共同事業 (1997) ・ バン/水素ガス NECAR I、 ・ バン/水素ガス NECAR II、250km、 ・ バス/水素ガス、NEBUS、250km ● 乗用/メタノール、NECAR III、400km ● 乗用/液体水素、1000km、 ● フォークリフト/水素ガス、 ○ バス/水素ガス、250km、 ○ バン/メタノール、 ○ バン/メタノール 	<ul style="list-style-type: none"> Daimler-Benz/BPS (1994) Daimler-Benz/BPS (1996) Daimler-Benz/BPS (1997) Daimler-Benz/BPS (1997) BMW/Rover (1996) Siemens (1997)、S B W 計画 MAN/Siemens (2000) Volkswagen (2000-2004) OPEL (2004)
カナダ	<ul style="list-style-type: none"> ● Ballard PS の燃料電池バスプロジェクト (1991 ~ 1997) ● Vancouver 市に 3 台試験投入運行 (1998 ~) ● Ballard PS の定置用燃料電池開発プロジェクト 	
米国	<ul style="list-style-type: none"> ● DOE 等の FCEV プロジェクト (1990 ~)ビッグ 3 等参加者多数 ● 乗用/水素ガス ● カート/水素ガス ● バス/メタノール ○ バン/メタノール ○ バン/ガソリン ● Chicago の市バス運行試験等デモンストレーションプロジェクト (1998 ~) ○ FCEV 用 FC 開発、 ○ DOE による Hydrogen Program (1992 ~)水素導入計画 	<ul style="list-style-type: none"> Energy Partner (1991) Shutz E.R.C. (1996) DOE/BPS (1998) GM (1998-2004) Chrysler Gr. (2004)
日本	<ul style="list-style-type: none"> ● NEDO PEFC プロジェクト (1992 ~) ● カート/水素ガス (MH) ● バン/水素ガス (MH)、250km ● バン/メタノール、400km ● バン/水素ガス (MH)、170km ○ バン/メタノール ○ 小型車/メタノール ○ W E N E T 計画における取り組み (1999 ~) ○ その他プロジェクト (NEDO ACE Project:1997 ~) 	<ul style="list-style-type: none"> マツダ/BPS (1992) トヨタ (1996) トヨタ (1997) マツダ (1997) 日産/BPS (1998-2003) 本田 (2003)

一方、純水素を用いれば、効率が高い、改質ガス(CO)の影響がない、改質システムや CO 除去システムが不要となるため、部品点数が少なく制御も容易で車の信頼性も高くなる。普及時の車体や燃料の価格が見通せないため経済性については不明であるが、燃費が 3 倍に向上すれば熱量当たりの価格がガソリンの 3 倍であっても良いことになる。水素燃料価格については天然ガスの水蒸気改質やオフピーク電力による水電解水素等によって製造された水素が課税ガソリンと競合できるとの解析もなされている²³⁾。

純水素を燃料とする場合の技術課題としては燃料水素タンクと水素供給ステーションの問題がある。タンクについては高压軽量ボンベ、液体水素、水素吸蔵合金が候補となっているが、ボンベ (ex. NECAR II : 140 bar, 250 気圧, 2 本, 250 km) は安全性に対する理解や取り扱い性に問題がある。液体水素は走行距離 (ex. BMW/Rover : 1000 km) に優れるが極低温であるためボイルオフや取り扱い性が問題、水素吸蔵合金は破損放出時の自己冷却によって極めて安全性に優れるが走行距離が短くなる (ex. TOYOTA, MAZDA : 250 km, 170 km) などそれぞれ一長一短がある。このため、WENET 第 2 期計画 (平成 11 年度～) で高密度水素吸蔵合金 (3wt%) の開発や水素ステーション技術が取り組まれる予定になっている。その他、科学的実証の蓄積が十分とは言えないがカーボンナノチューブ²⁴⁾やグラファイトナノファイバー²⁵⁾が新しい水素貯蔵材料として注目されている。

いずれにせよ純水素燃料自動車は水素のインフラ整備・育成がなければ、近未来における市場規模の拡大は困難と考えられているが、一定区間、一定距離を往復走行するバスやトラックを対象にすれば、水素供給の設備も少なくすむためインフラの問題も少なく純水素でも比較的早く実用化されるとも考えられている。表 2 のバスプロジェクトはこのような観点で行われている。

FCEV 試作車の公表されている仕様を見ると、Daimler-Benz が PEFC 出力 (50 kW) をそのままエンジン代替と使用しているに対して、TOYOTA と MAZDA は補助動力として二次電池あるいはキャパシターを備えており、加速時等にはハイブリッド走行、定速時には PEFC から余剰となる電力を補助動力に充電するいわゆるロードレベリングシステム機能を採

用しているため PEFC 出力は比較的小さく (20 kW)、ガソリン燃費換算で約 2.5 倍 (TOYOTA) と効率も高い。水素燃料 FCEV では設計された燃料タンクの容量では走行距離の短さに課題を残しているが、メタノール改質ガスの FCEV (Daimler-Benz, TOYOTA) ではほぼガソリン車並の走行距離となっている。将来、ハイブリッド方式か PEFC 単独方式かは、走行性が同じであれば車体、燃費、維持費等のトータルコストで決まる問題であろう。

1997 年 8 月に開始した Daimler-Benz/BPS の FCEV 共同事業、および同年これに Ford が出資・参画し 2004 年の量産化を目指した共同事業の動きは、他自動車メーカーにインパクトを与え、実用化開発を加速した。この事業が公表されてから他自動車メーカーも実用化の目標年 (2003-2004) を明言する企業 (表 2 の○参照) が多くなっている。経済性の向上が最も大きな課題であることが誰もが認めるところであるが、燃料供給インフラ等の不透明な問題もあり、本格的な実用化時期を見通すためにはもう少し時間が必要であろう。

5.2 自動車以外の用途

PEFC はリン酸型とくらべて小型軽量化が可能であるため 1~3 kW 程度の非常用あるいはレジャー用のポータブル小型電源用途が期待されておりすでに小型化、低価格化を実証し事業化を表明している企業もある。数百 kW 程度の定置用電源のプロジェクトもなされているが、常温作動型の PEFC では熱利用がしにくく高い総合効率が得られにくい問題もあり、ポータブル電源用途以外では、50 kW 以下の用途、例えば、給湯、床暖房など温熱利用も併用する家庭用・小型民生用のコジェネレーション等が中心になると考えられる。この場合には PEFC の高温化技術と長寿命化が課題となろう。

ニューサンシャイン計画で実施されている PEFC のプロジェクトでは第 1 期 (平成 4~7 年度) の目標値 (水素/空気, 0.3 W/cm²) を達成し、第 2 期 (平成 8~12 年度) で、メタノール、天然ガス等の改質ガスを燃料とした数~数十 kW 級の家庭用電源、可搬型、分散型の PEFC 開発を行っている。4 節で述べたように小型改質器の開発から CO 対策技術、セルの積層工学技術、触媒量の低減、イオン交換膜、金属セバ

ンター、寿命対策、低コスト化等幅広い開発が推進されている。

これらの用途は経済性において自動車より厳しくないため比較的早く普及する可能性があると考えられるが、逆に自動車用途がひらけると大幅な低価格化が進みこの分野での本格的市場拡大も期待される。

6. 水素導入への期待

C O P 3 の科学的知見のもとになった IPCC (気候変動に関する政府間パネル) 第 2 次報告書等に見られるように、21 世紀中頃には再生可能エネルギー源水素が相当量導入されるとの予測がなされている。超長期的には電気とともにクリーンな水素が主要なエネルギー媒体になるというのが一般的な認識であろう。しかしながら、経済的合理性の下に形成されている現在のエネルギーシステムにおいて、地球温暖化 CO₂ 削減策の実行義務があるとはいえ、21 世紀の中頃までの水素導入過程を見通すことは極めて難しい問題である。このような状況下において、ここで取り上げた PEFC を搭載した FCEV の近未来における事業化の動きは極めて注目に値する。FCEV の本格的な市場導入予測も 1996 年の予測²⁹⁾では 2020 年以降とされていたが、最近の予測ではさらに早まり 2010 年には世界で 10 兆円産業になるとも言われ出した²⁹⁾。自動車という社会的インパクトが大きいかつ PA (Public Acceptance) の得やすい技術形態であるとともに、化石燃料源水素であっても水素を用いれば高効率利用でき、地球環境に適合した新しい産業が生まれる可能性があること、過渡的には原子力の余剰電力源水素の利用、さらに将来の再生可能エネルギー源水素時代に必要インフラストラクチャーの橋渡しあるいは優れたエネルギー媒体である水素の利用形態のフロンティアになる可能性が期待できる。

参考文献

- 1) Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell Technology Program (General Electric Co.), Final Report, NASA-CR-160734 (1980).
- 2) K. B. Prater, *J. Power Sources*, 29, 239 (1990).
- 3) G. A. Eisman, *J. Power Sources*, 29, 389 (1990).
- 4) M. W. Verbrugge, R. F. Hill, *J. Electrochem. Soc.*, 137,

3770 (1990).

- 5) 特開平 8-171920
- 6) 脇添、蜂谷、武井、第 4 回燃料電池シンポ。ソワム講演要旨集、FCDIC, 140(1996).
- 7) T. Momose, H. Yoshioka, I. nagaki, J. Okamoto, *J. Appl. Polym. Sci.*, 37, 2817 (1989).
- 8) F. N. Buchi, B. Gupta, O. Haas, G. G. Schere, *Electrochimica Acta.*, 40, 345 (1995).
- 9) S. Nezu, H. Seko, M. Gondo, N. Ito, Abstracts 1996 Fuel Cell Seminar, Nov. 17-20, 1996.
- 10) J. S. Wainright, J. T. Wang, D. Weng, R. F. Savinell, M. Litt, *J. Electrochem. Soc.*, 142, L121 (1995).
- 11) J. T. Wang, R. F. Savinell, J. Wainright, M. Litt, H. Yu, *Electrochim. Acta.*, 41, 193 (1996).
- 12) USP 5, 498, 639.
- 13) J. T. Hinatsu, M. Mizuhata, H. Takenaka, *J. Electrochem. Soc.*, 133, 88 (1994).
- 14) H. Takenaka, Y. Oka, M. Katsuta, *Proc. International Fuel Cell Conference*, 417 (1992), Makuhari.
- 15) H. P. Dhar, J. H. Lee, K. A. Lewinski, 1996 Fuel Cell Seminar, Orland (1996)
- 16) A. Sonai, *Proc. 2nd Int. Fuel Cell Conf.*, 375 (1996).
- 17) M. Watanabe, H. Uchida, M. Emori, 2nd Inter. Fuel Cell Conf., 343 (1996).
- 18) R. A. Lemons, *J. Power Sources*, 29, 251 (1990).
- 19) 河津、岩瀬、第 36 回電池討論会、241 (1995).
- 20) E. A. Ticianelli, C. R. Derouin, S. Srinivasan, *J. Electrochem. Soc.*, 137, 3770 (1990).
- 21) S. Srinivasan, D.M. Manko, H. Koch, M.A. Enayetullah, A. J. Appleby, *J. Power Sources*, 29, 367 (1990).
- 22) Distributed at The 4th Daimler-Benz Seminar (1997).
- 23) D. B. BeII, J. A. Adams, B. K. Powell, R. I. Sims, "Ford's R&D Activities on Direct-Hydrogen PEM Fuel Cell Systems", paper distributed at EVS15 (1998).
- 24) A. C. Dillon, K. M. Jones, T. A. Bekkedahl, C. H. Kiang, D. S. Bethune, M. J. Heben, *Nature*, 385, 377 (1997).
- 25) A. Chambers, C. Park, R. T. K. Baker, N. M. Rodriguez, *J. Phys. Chem. B*, 102, 4253 (1998).
- 26) ETSU-N-131, July, 1996.
- 27) 日経産業新聞、1998 年 8 月 25 日付け 1 面および 1998 年 10 月 6 日付け 12 面。